

## 同時連鎖法を用いた系列学習研究の動向

社会環境科学研究科 地域社会環境学専攻

木 村 誠

人間社会環境研究科 人間文化専攻

石 坂 憲 寿

谷 内 通

### A review of serial learning studies using the simultaneous chaining method

KIMURA Makoto, ISHIZAKA Norihisa and TANIUCHI Tohru

#### Abstract

In serial learning studies, the item-selection method has been used to determine animal serial learning processes. In particular, the simultaneous chaining method, a type of item-selection method, has been applied in a number of studies on pigeons, non-human primates, and humans. In this method, all items are displayed throughout each trial and the subject is required to respond to each item in a prescribed order. Because no differential feedback is provided as to the identity of the next correct item, the subject must form an internal representation of the item series that defines the current serial position. Although in early studies the main interest was to investigate animal learning strategies, a variety of other subject matter (e.g., serial expertise, numerical ability, distance and magnitude effects, and chunking) continues to be investigated. In this report, we review articles that focus on the simultaneous chaining method in order to grasp the present situation and prospects of this method. And in the second half of this review, we report our experiments on serial learning in rats using the modified Hill-maze.

#### Key Words

serial learning, simultaneous chaining method, animal cognition

ヒトの情報処理能力の一つの特徴として、情報の序列化の能力が挙げられる。ヒトによる情報の序列化は具体的水準から、極めて抽象的な水準に至るまで非常に柔軟に行われている。例えば、金額の高いものから順に商品を並び替える場面や、社会的な場面で、職位、年齢、入社時期などといった複数の情報をもとに人物の序列化を行う場面などが挙げられる。ヒトの、情報の序列化の能力は、個別の学習された序列の適用という視点では説明が困難である。なぜなら、動的な社会場面に

おいては、個別に学習された序列が適用できる状況は、極めて限定されるからである。 $A > B$ ,  $B > C$  という個別に学習された序列は、 $D$  という事象が加わることや、環境が変化することで、その状況における正しい序列は変化する。そのような中でもヒトが柔軟に情報の序列化を行うことができるという事実は、ヒトが常に変化する状況の中で、その状況において正解とされる序列の表象を臨機応変に形成していることを示唆するものである。文脈あるいは直前の刺激に応じて適切な情

報の序列化を行うことは、ヒトが社会において適応的に生きてゆくために重要な能力であるといえるだろう。序列化の能力がうまく機能するためには、個別の順序や序列に関する学習をもとに、統合された心的表象を形成する能力が必要である。このような事象の順序や序列に関する心的表象の形成について、他の動物種においては、主に系列学習という研究領域で多くの検討がされている。系列的表象の形成能力を系統発生的に異なる動物種と比較することで、他種とヒトの共通性と差異が明確となり、複雑な環境の中で適応的に生きる動物の能力を理解する手がかりとなることが期待される。

### 同時連鎖法の確立

動物における系列学習の研究領域では、同時連鎖法 (Simultaneous chaining method) を用いた検討が、視覚優位の霊長類と鳥類で行われ、多くの知見が得られてきた。同時連鎖法では、被験体はディスプレイ上に同時に提示された複数の視覚刺激に対して定められた順序で反応することが要求される。例えば、ディスプレイ上に同時に提示されたそれぞれ色の異なる5つのパッチを、実験者の定めた順序でタッチしてゆくことが求められる。そして、5つパッチを正しい順序で連続してタッチした場合には報酬が与えられる。同時連鎖法の特徴は、試行内ですべての刺激が提示され続けること、特定の刺激への反応の後に、その次に反応すべき項目を識別するための有効なフィードバックが与えられないこと、項目の提示される空間位置が試行間でランダムに変わることが挙げられる。これらの制約のもとで習得される被験体の系列への反応は、伝統的な連鎖理論から導かれる反応連鎖による考え方からは説明が困難であることも、同時連鎖法を用いた研究の大きな特徴である。伝統的な連鎖理論の基となった系列学習法である継時連鎖法 (successive chaining method) では、選択点の空間的位置は常に固定されているため、特定の反応連鎖による学習が可能である。反応連鎖とは、構成要素となる複数の反応間に連合が形成

されることにより、複雑な系列的な反応を獲得することである。反応連鎖では、先行する反応要素が後続の反応の手がかりとなる。つまり、常に選択項目が固定されているような課題の場合は、特定の反応パターンを習得すれば、系列の遂行が可能となるのである。これに対し、同時連鎖法では項目の空間的位置が試行間でランダムに変更される。このため、被験体は項目の順序を導くための情報を内的に保持するための学習を行うことが必要になる。

反応連鎖による学習の可能性については、同時連鎖法を用いた初期の研究 (Straub, Seidenberg, Bever, & Terrace, 1979) において検証がなされた。この実験ではハトを被験体とし、4つの反応キーに4つの色を提示し、これに一定の順序で反応させる訓練を行った。 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$  という系列的反応を習得させるために、まずDに反応させる訓練を行い、その後、 $C \rightarrow D$ ,  $B \rightarrow C \rightarrow D$ ,  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$  という逆向連鎖による訓練を試みたが、 $C \rightarrow D$  の訓練段階において、ハトは最初にDに反応し続け、逆向連鎖による訓練は達成されなかった。そこで、Straub et al. (1979) は、 $A \rightarrow B$ ,  $A \rightarrow B \rightarrow C$ ,  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$  という順向連鎖による訓練を行った。その結果、ハトに4項目系列  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$  を習得させることに成功した。4つの反応キーに4つの色刺激を提示する場合、それらの刺激の取りうる配列は24通りであるが、そのうち15配置を4項目系列の習得訓練に用いた。その後、訓練時に用いなかった新奇の刺激配列における般化テストを行った。ハトは新奇配列に対して、チャンスレベル (1%未満) をはるかに超える正反応率 (32%) を示したが、訓練配列における正反応率 (57%) と比べると低いものであった。これを受け、Straub & Terrace (1981) は、反応キーの数を4つから6つに増やし、ハトに4項目系列を習得させた。訓練は80の訓練配列によって行い、般化テストでは20の新奇刺激配列を用いた。般化テストの結果、新奇配列における正反応率は訓練配列における正反応率と同等で、完全な般化が生じたことが示された。Straub et al. (1979) と Straub

& Terrace (1981) の研究から、訓練配列が少ない場合、特定の刺激配列に対する特定の反応連鎖の学習が関与すること、訓練配列を多くすることで反応連鎖の学習の関与を排除することができることが示された。これらの研究は、特定の反応連鎖の学習を介さない系列の遂行方略を研究する足掛かりとなった。

### 基本的学習過程

事象系列の代表的な学習過程は2つに分けられる。第1の学習過程は項目間連合の形成によるものである。例えば、系列がA-B-C-Dという4つの項目によって構成されている場合、項目間の連合は、試行の開始→A, A→B, B→C, C→D, のように個別に形成される。同時連鎖法の場合は、刺激項目自体は提示され続けているので、正確にはこれらの項目間連合における弁別手がかりはAへの反応, Bへの反応, Cへの反応となる。そして行動レベルでは、学習されたそれらの連合にしたがってA→B→C→Dという系列的な反応が観察される。項目間連合の形成による系列学習では、各項目が次の項目を信号する予測子として機能するため、いずれかの項目が不在の場合にはそれ以降の系列反応は中断されるという特徴がある。例えば、A-B-C-D系列を項目間連合によって学習すると、BとCのみを提示すると、“Aへの反応”という手がかりが存在しないために、BとCにでたらめな順序で反応することが予測され、実際にハトではそのような現象が確認される (Terrace, Chen, & Newman, 1995)。

第2の学習過程は、系列位置学習である。例えば、A-B-C-D系列の場合には、各項目は先行する項目 (への反応) を手がかりとするのではなく、1,2,3,4という系列位置情報によって反応すべき順序が与えられる。系列位置情報を提供する情報源は、時間、数、空間的性質等の複数の候補が考えられるが、サルは空間的性質を持つ系列の心的表象である線形表象を形成することによって系列を学習・遂行することが示唆されている (D'Amato & Colombo, 1988)。系列位置学習では、先

行する項目が別の項目によって置き換えられても、系列位置情報によって標的項目に正しく遂行するという現象が確認される (D'Amato & Colombo, 1989; Chen, Swartz, & Terrace, 1997)。

このように、同時連鎖法は反応連鎖理論では説明することのできない系列学習の学習過程、すなわち系列的表象の形成の問題を複数の動物種において明らかにしてきた。また、同時連鎖法を用いた研究は、系列学習だけでなく、別のタイプの抽象的表象の形成に関わる動物の認知機能の研究へと展開されている。本稿では同時連鎖法を用いた系列学習の研究を、ヒトと始めとして、ハト、サルについてレビューし、各種における系列的表象の形成能力の特徴を明らかにする。また、同時連鎖法を、げっ歯類の系列学習研究に適用することを目的として、筆者らが行った改良型 Hill 迷路による検討について、現時点までの成果を報告する。個別の動物種についての研究のレビューの後、系列的表象の形成における種差について検討する。また、最後に事象の序列化の能力を検証する方法としての同時連鎖法の展望を述べる。

### ハトにおける同時連鎖法を用いた研究

同時連鎖法が特定の反応連鎖の学習による系列の遂行の可能性を排除したことによって、系列遂行時の遂行方略をより特定しやすくなったといえるだろう。系列の遂行方略については、動物が項目を系列位置情報を基に体制化しているという系列位置学習と、動物が個々の項目間の連合を形成することによって系列的に反応しているという項目連合学習が提案され、議論されてきた。本節では、初めて同時連鎖法が適用されたハトの系列学習について、これらの学習過程を検証した一連の研究をレビューする。また、項目の情報の系列的な体制化にチャンキングがどのように関与するのかについても触れる。

### 遂行方略の検証

Terrace (1986) は、第1段階として、同時に提

示された2つの項目(A, B)を $A \rightarrow B$ と反応する2項目段階の訓練から開始し、次に3つの項目(A, B, C)を $A \rightarrow B \rightarrow C$ の順序で反応できるようにハトを訓練した。最初に訓練された系列を原系列と呼ぶ。次に、第2訓練として原系列における色項目の系列位置が第2系列でも維持された群( $A \rightarrow X' \rightarrow Y'$ ,  $X' \rightarrow B \rightarrow Y'$ ,  $X' \rightarrow Y' \rightarrow C$ )と、維持されなかった群( $X' \rightarrow A \rightarrow Y'$ ,  $X' \rightarrow Y' \rightarrow A$ ,  $B \rightarrow X' \rightarrow Y'$ ,  $X' \rightarrow Y' \rightarrow B$ ,  $X' \rightarrow C \rightarrow Y'$ ,  $C \rightarrow X' \rightarrow Y'$ )の2群にハトを分け、訓練を行い学習の転移を検証した。系列位置が維持されたグループは、第2系列を学習するのに原系列 $A \rightarrow B \rightarrow C$ を学習するよりも少ないセッション数で学習基準に達した。項目A, Cは特異的な明瞭性を持つと考えられる末端項目であり、デフォルトルール(1. 項目Aに最初に反応する。2. 項目Cには最後まで反応しない。3. 項目Cに反応する前に残った項目に反応する)の適用が示唆されるが、内部項目である項目Bについては、原系列の学習時に系列位置情報が獲得されていたと考えられた。しかし、原系列の学習時に、項目Bがデフォルトで反応すべき項目と学習されていたため $X' \rightarrow B \rightarrow Y'$ の学習が促進された可能性も否定できない。項目Bへの反応が、デフォルトルールによって決定されていたならば、ハトが項目Bの正確な系列位置情報を獲得していたと断定することはできない。

Terrace, Chen, & Newman (1995)は、ハトを、3, 4, 5項目系列を学習する群に分け、サブセットおよびワイルドカード(欠損項目を補完する万能刺激)への反応を検証した。原系列の訓練は2項目系列( $A \rightarrow B$ )から開始し、3項目系列、4項目系列、5項目系列の順で訓練が行われた。原系列の習得後、サブセットテストとワイルドカードテストを行った。サブセットテストとは、原系列から2項目を抽出して提示し、2項目への反応をみるテストである。3項目系列を学習したハトに対しては、AB, BC, ACというサブセットが提示された。例えば、サブセットBCが提示された場合、ハトは原系列( $A \rightarrow B \rightarrow C$ )の順序に従

って $B \rightarrow C$ と反応することが求められた。ワイルドカードテストとは原系列を構成する項目のいずれか1項目がワイルドカード(W)に置き換えられた系列の習得を吟味するものである。たとえば、5項目系列 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$ を学習したハトに、項目A, B, C, W, Eが提示された場合、項目Dがワイルドカード(W)で置換されているため、 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow W \rightarrow E$ と反応することが求められた。3項目系列( $A \rightarrow B \rightarrow C$ )を学習したハトはすべてのサブセット(AB, BC, AC)に正しく反応した。またすべてのワイルドカード試行( $W \rightarrow B \rightarrow C$ ,  $A \rightarrow W \rightarrow C$ ,  $A \rightarrow B \rightarrow W$ )においても正しい順序での遂行が認められた。これに対し、4項目系列および5項目系列( $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$ ,  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$ )を学習したハトは、内部項目のみで構成されるサブセットに対しては、遂行がチャンスレベルに留まった。ワイルドカード試行では最終項目がワイルドカードで置換された系列( $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow W$ ,  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow W$ )においてのみ、チャンスレベルを超える遂行が認められた。

サブセットテスト、ワイルドカードテストの結果から、ハトはデフォルトルールによって系列を習得していることが示唆された。しかし、内部項目のみで構成されたサブセットテストにはチャンスレベルで反応していたにもかかわらず、複数の内部項目を含む4項目、5項目の原系列の訓練時において優れた遂行を示したという結果は、デフォルトルールの適用のみでは解釈が不可能である。4, 5項目系列の場合は、末端項目に関してはデフォルトルールが適用され、内部項目には項目間連合が形成された可能性が指摘できる。項目間連合では、項目nに反応することが次の項目n+1に反応する手がかりとなる。つまり、原系列の遂行時には、まず、デフォルトルールを適用して最初に項目Aに反応した。そして第2項目、第3項目への反応は、項目間連合(A-B)と項目間連合(B-C)から導かれたと説明できる。原系列の遂行時には、ハトは最初に反応すべき項目Aの存在によって内部項目について順序どおりに反応できたと解釈できる。従って、BCという内部項目

のみで構成されるサブセットの場合、最初に反応すべきという項目 A が存在しないため、原系列遂行時には機能する項目間連合が、内部項目のみのサブセットテストにおいては機能しなくなったと考えられる。

原系列の内部項目における項目間連合の形成については、次のようなテスト法が考えられる。例えば、ハトに 5 項目系列を学習させた後、BC のサブセットテストを行う。ここで、始めに B のみを提示して強制選択させた後、B と C を同時に提示する。チャンスレベル以上の水準で C へ選択が認められれば、B に反応することが次に C を選択する手がかりになっていたことになる。このような結果が得られるならば、内部項目については項目間連合が利用されていた可能性を主張できるだろう。

### 系列的情報のチャンク化

Terrace (1987) は、ハトにおける系列情報のチャンク化の能力を検証した。色項目のみの 5 項目系列習得群 (グループ 1:  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$ )、色項目と幾何学図形項目が凝集された 5 項目系列習得群 (グループ 2:  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D' \rightarrow E'$ , グループ 4:  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E'$ )、色項目と幾何学図形項目が凝集されていない 5 項目系列習得群 (グループ 3:  $A \rightarrow B' \rightarrow C \rightarrow D' \rightarrow E$ , グループ 5:  $A \rightarrow B \rightarrow C' \rightarrow D \rightarrow E$ ) を訓練した後、サブセットテストを行った。習得訓練は 2 項目系列から開始し、5 項目系列まで行った。5 項目系列の習得速度は、色と形が凝集されており、チャンク化の基盤が与えられていたグループ 2, グループ 4 において速やかであった。

訓練段階ごとの比較では、グループ 2, グループ 4 は、チャンクの境界、つまり新たに追加される項目が幾何学図形項目となった段階で、習得に要するセッション数が減少した。他のグループでは、訓練段階が進むにつれて、習得に要するセッション数は段階的に増加した。

サブセットテストにおいては、グループ 2 は、内部項目のみで構成されるサブセットを含め、す

べてのサブセットへ高い遂行を示した。また、グループ 4 はサブセット BC を除いて高い遂行を示した。その他のグループでは、内部項目のみで構成されるサブセットについてはチャンスレベルでの遂行に留まった。上述した通り、ハトはデフォルトルールを用いてサブセットテストに反応することが指摘されている。n 項目系列 ( $n > 3$ ) においては、末端項目 A および n のいずれかまたは両方がサブセットに含まれている場合は正しく遂行が可能であるが、内部項目のみで構成されるサブセットには原系列に従った順序で反応することが困難となる。しかしながら、グループ 2 はすべてのサブセットに高い遂行を示した。この結果は次のように解釈できる。5 項目系列  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D' \rightarrow E'$  を色項目のチャンク ( $A \rightarrow B \rightarrow C$ ) と幾何学図形項目のチャンク ( $D' \rightarrow E'$ ) として体制化すると、各チャンク内で内部項目が 2 項目以上存在しなくなる。その結果、各チャンク内でデフォルトルールが適用可能になったと考えられる。グループ 4 については、要したセッション数からチャンク化が行われたと考えられる。しかしながら、色項目のチャンク ( $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$ ) が 4 項目で体制化された場合には、チャンク内の内部項目が 2 項目となり、デフォルトルールが適用できなくなる。その結果、サブセット BC に正確に反応することができなかったのだと考えられる。ハトは言語的な符号化が不可能にもかかわらず、系列情報をチャンクとして符号化することが可能であることが強く示唆された。

また、Terrace (1991) は系列全体の遂行時間、反応潜時、休止時間を指標として用いてチャンク化の検証が可能であることを示した。系列全体の反応潜時は、全ての項目が提示される試行の開始から、最後の項目に反応するまでの時間である。項目が凝集されチャンク化の基盤が与えられていたハトのグループ ( $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D' \rightarrow E'$ ,  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E'$ ) では、系列全体の遂行時間が短かった。反応潜時は、特定の項目に反応するまでに要する時間である。項目 A に反応する場合は、試行開始から項目 A への最初の反応までの時間が

反応潜時となる。項目 B への反応潜時は、項目 A への最後の反応から項目 B への最初の反応までの時間が反応潜時となる。休止時間はある項目への最初の反応から同じ項目への最後の反応までの時間である。ハトを用いる実験では、ハトの行動習性を考慮して、例えば 5 項目系列  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$  について、 $A \rightarrow A \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow D \rightarrow D \rightarrow E$  のように同一項目への反復反応が生じた場合にも正反応とみなす。このような手続きを用いることから、休止時間という指標を利用することが可能となる。結果、項目が凝集されていたグループのハトは、チャンクの境界の項目での休止時間が他の項目での休止時間に比べ長くなった。Terrace (1991) は、色項目と幾何学図形項目が凝集されており、チャンク化の基盤を与えられたハトは、色項目のチャンクから幾何学図形項目のチャンクへの移行のため、チャンクの境界での休止時間が長くなるのだと指摘している。

Terrace & Chen (1991a) は、原系列の習得過程で形成されるチャンクが別の系列に含まれる場合に、原系列と同様にチャンクとして機能する可能性について検討した。2 項目系列の訓練から開始し、5 項目系列までの習得を行わせた。第 1 段階では、グループ 1 に色項目と幾何学図形項目（項目  $D'$ 、項目  $E'$ ）が凝集された系列（ $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D' \rightarrow E'$ ）を学習させ、グループ 2 には色項目のみの系列（ $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$ ）を学習させた。その後、サブセットテストを行った。続いて、第 2 訓練を行った。グループ 1、2 をさらにそれぞれ 2 つのグループに分けた。グループ 1-1 は  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow F \rightarrow G$ 、グループ 1-2 は  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D^* \rightarrow E^*$ （ $D^*$ 、 $E^*$  は色項目）を学習した。グループ 2-1 は  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow F \rightarrow G$ 、グループ 2-2 は  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D' \rightarrow E'$  を学習した。いずれのグループも系列の  $A \rightarrow B \rightarrow C$  までは原系列と一致しているが、続く項目が、新奇の色項目または幾何学図形項目によって構成されていた。第 1 段階でグループ 1-1 と 1-2 が系列  $A \rightarrow B \rightarrow C$  をチャンク化していたのであれば、第 2 段階での習得速度はグループ 2 よりも速やかになることが予測された。

結果は予測と一致したものであった。このことから、第 1 段階で形成されたチャンクが新しい系列でもチャンクとして機能することが示された。サブセットテストの結果からも、原系列で形成されたチャンクが、別の系列に含まれた場合にもチャンクとして機能することが示された。さらに、形成されたチャンクの系列位置が新たな系列で変化していてもチャンクとして機能することが認められた。例えば、原系列  $A \rightarrow B \rightarrow C' \rightarrow D'$  を習得した後、系列  $X' \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow Y'$  の習得訓練を行うと、チャンクとして形成されていない、項目 B、項目  $C'$  が含まれていた系列  $X' \rightarrow B \rightarrow C' \rightarrow Y'$  の習得よりも速やかな習得が認められた。

Terrace & Chen (1991b) は、ハトによるチャンクの形成に必要な条件を検討した。まずハトは 4 群に分けられ（グループ 1： $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D' \rightarrow E'$ 、グループ 2： $A' \rightarrow B' \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$ 、グループ 3： $A' \rightarrow B' \rightarrow C' \rightarrow D \rightarrow E$ 、グループ 4： $A \rightarrow B \rightarrow C' \rightarrow D' \rightarrow E'$ ）、系列の最初から 2 項目目までが凝集されている場合と 3 項目目までが凝集されている場合について、2 項目系列の訓練から開始し、チャンク化がどの段階で成立するのかを検証した。その結果、習得に要する試行数が減少したのは 4 項目系列の段階であることがわかった。また、ハトを 4 群に分け 4 項目系列の習得を行わせたところ（グループ 1： $A \rightarrow B \rightarrow C' \rightarrow D'$ 、グループ 2： $A' \rightarrow B' \rightarrow C \rightarrow D$ 、グループ 3： $A \rightarrow B' \rightarrow C' \rightarrow D$ 、グループ 4： $A' \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D'$ ）、1 番目と 2 番目の項目、3 番目と 4 番目の項目がそれぞれ凝集されていたグループでは、4 項目段階で習得に要する試行数が減少した。また、サブセットテストの結果、項目が凝集されていた系列では全てのサブセットについて高い水準での遂行が認められた。習得に要する試行数やサブセットテストの結果から、ハトにおけるチャンク化の成立要因としては、4 項目系列以上であること、および同一カテゴリの項目が 2 つずつ凝集されていることが必要であることが示された。

## サルにおける同時連鎖法を用いた研究

同時連鎖法を用いた系列学習研究は、ハトだけでなくサルについても適用されてきた。この節では、サルにおける系列の遂行方略の検証から、同時連鎖法を用いた系列学習の熟練、距離と大きさの効果、数的な序列化の能力についての知見を紹介する。

### 遂行方略の検証

D' Amato & Colombo (1988) は、フサオマキザルを用いて系列の遂行方略の検討を行った。2項目系列から訓練を開始し、3,4項目系列の訓練が完了した後に、項目の新奇配列への転移テストを行った。結果、訓練時と同等の水準での遂行が認められた。これは、フサオマキザルが反応連鎖によって系列を学習していた可能性を排除する結果といえる。4項目系列の訓練終了後、および5項目系列の訓練終了後に行われた2項目および3項目からなるサブセットテストでは、内部項目のみのサブセットを含め、すべてのサブセットで、チャンスレベルを有意に超える遂行が認められた。また、サブセットテストにおける第1項目への反応潜時は、第1項目の原系列における位置に対応して長くなった。また、サブセットテストで用いられた項目間に原系列で存在していた項目数が増えるほど、サブセットの2項目目への反応潜時が長くなった。これらの結果は、フサオマキザルが系列の線形表象を形成し、第1項目から検索を始め、 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$ の順序で表象を辿っていたことを示唆するものであった。

D' Amato & Colombo (1989) は、D' Amato & Colombo (1988) で用いたものと同じフサオマキザルを用いて、項目間連合の形成によってワイルドカードテストが遂行される可能性を検証した。初めに3項目系列の段階までの再訓練を行い、ワイルドカード (Y) によるワイルドカード系列の訓練を行った。次にワイルドカード (X) で訓練を行った。続いて、再び項目 Y を用いたワイルドカード系列の訓練を行い、最後に項目 X を用い

たワイルドカード系列の訓練を行った。さらに4項目系列の訓練終了後、および5項目系列の訓練終了後にも同様のワイルドカード訓練を行った。どの項目段階においても、初めに実施されたワイルドカード (Y) 訓練よりも、後に実施されたワイルドカード (X) 訓練において優れた遂行が認められた。フサオマキザルが項目間連合を形成していたとすれば、初めのワイルドカード訓練で形成された項目 Y と隣接項目間の連合は、項目 X を用いたワイルドカード訓練では利用できず、新たに隣接項目と項目 X との間に連合を形成する必要がある。しかしながら、項目 Y を用いたワイルドカード訓練から項目 X を用いたワイルドカード訓練の間には正の転移が認められ、項目間連合の形成の可能性は排除された。さらに彼らは、系列内にワイルドカードを2項目 (X, Y) 導入する2重ワイルドカード試行を行った。サルが項目間連合を形成するならば、ワイルドカードが隣接する系列への遂行は困難になること、また項目 X と項目 Y の前後関係が変動することも遂行を阻害することが予測された。しかしながら、実験の結果、ワイルドカードが隣接している条件においても、無誤系列完遂率は約60%まで達した。このことから、フサオマキザルが項目の系列位置情報を獲得しており、その情報が線形空間上に系列的順序に従って並べられていた可能性が示唆された。しかし、Terrace et al. (1995) が述べたように、D' Amato & Colombo (1989) の用いたフサオマキザルが、原系列の系列位置を習得し、ワイルドカード試行においては、ワイルドカードに置換された項目の系列位置を把握した上で、そのギャップをワイルドカードによって埋めていたかについては疑問が残る。フサオマキザルが、系列内のギャップを埋めるべき項目を、排他的に選択した結果、ワイルドカードが消極的に選択された可能性もある。すなわち、選ぶべき項目が存在しないので、ワイルドカードに反応したという可能性である。フサオマキザルが、ワイルドカードについて、どの項目とも置換可能であるという抽象的な意味を理解していたかについては、種を問わず、

これまでのところ明確には証明されていないと思われる。

抽象的なワイルドカード使用法の学習に関する検証のためには、次のような方法が有効であると考えられる。まず、原系列を1つ学習させる。次にワイルドカードを用いて訓練を行う。さらに、第2の新たな系列を学習させた後に、最初の系列で用いたワイルドカードを用いてワイルドカード訓練を行う。もし、新たな系列のワイルドカードテストにおいて高いパフォーマンスが認められれば、ワイルドカードがどの項目とも置換可能であるという抽象的な知識を得ていた可能性が示唆されるだろう。

Swartz, Chen, & Terrace (1991) は、アカゲザルを用いて学習方略の検討と系列習得の効率化について検討した。同時連鎖法を用いて4種類の4項目系列を1系列ずつ学習させた。4つの系列の習得後に再訓練を行ったところ、学習に要した試行数は最初の訓練時よりも減少した。続いて行った2項目および3項目サブセットテストでは、すべてのサブセットについてチャンスレベルを超える遂行が認められた。これは D'Amato & Colombo (1988) のフサオマキザルを用いて行った実験と類似した結果であった。さらに、新たな4つの系列を学習させることにも成功した。サブセットテストを行った結果、反応潜時のパターンについても D'Amato & Colombo (1988) の結果と類似していた。これらの実験の結果からアカゲザルもフサオマキザルと同様に線形表象を形成していることが示唆された。また、複数の系列を学習するうちにその学習効率が良くなること、および系列の保持が比較的容易に行われていたことが示された。

Chen, Swartz, & Terrace (1997) は系列間転移課題を用いてアカゲザルの系列位置学習について検討した。4つの4項目系列 ( $A1 \rightarrow B1 \rightarrow C1 \rightarrow D1$ ,  $A2 \rightarrow B2 \rightarrow C2 \rightarrow D2$ ,  $A3 \rightarrow B3 \rightarrow C3 \rightarrow D3$ ,  $A4 \rightarrow B4 \rightarrow C4 \rightarrow D4$ ) を学習させた。その後に入れ替え系列を用いて訓練した。入れ替え系列は維持系列と変化系列の2種類があった。維持系列は、項目の系列位置が原系列と一致しており (e.

g.,  $A2 \rightarrow B4 \rightarrow C1 \rightarrow D3$ ), 変化系列は、項目の系列位置が原系列とは異なる系列であった (e.g.,  $B3 \rightarrow A1 \rightarrow D4 \rightarrow C2$ )。実験の結果、維持系列についてはほぼ誤反応無しで習得した。一方、変化系列では、新奇の系列を学習した場合と同等の試行数を要した。原系列の学習時に項目間連合を形成していたとすれば、いずれの項目間連合も入れ替え系列では利用不可能であり、新たな連合を形成する必要がある。そのため、維持系列と変化系列の遂行に差は認められないことが予測される。この結果は、アカゲザルが原系列の習得時に、項目の系列位置の知識を獲得していることを示唆するものである。

Orlov, Yakovlev, Hochstein, & Zohary (2000) はアカゲザル、カニクイザルを用いて系列の学習方略と系列的順序に基づく項目の再生過程について検討した。彼らは遅延系列再生課題を行った。見本段階では、3つの画像からなる見本系列が継続的に提示され、テスト段階では同時に提示された。テスト段階では、被験体は見本段階で提示された順序で3つの刺激に触れる必要があったが、同時に27の画像からランダムに選ばれたディストラクタも併せて提示された。サルが、与えられたリストの断片的な刺激間で項目間連合を形成するならば、ディストラクタへの誤反応は、選択の1番目、2番目、3番目のそれぞれで等しく起きることが予測される。しかしながら実験の結果、提示された系列の項目と同じ系列位置を占めていたディストラクタへの誤反応の頻度が高いことが認められた。このことは2種のサルにおいて系列位置学習がなされていることを示唆するものである。Orlov et al. (2000) は、この遅延系列再生課題において、サルは複数系列の表象をそれぞれ系列位置のカテゴリごとに長期記憶として保持し、必要に応じて長期記憶から検索することによって課題を遂行したと考えている。しかし、同じ系列位置を占めるディストラクタがあると、系列位置カテゴリの表象を手がかりとするだけではターゲットとなる画像の弁別ができない。そこで2次的な方略として、ワーキングメモリに呼び出されたター



ゲットの系列に関する表象内の項目間連合を利用することにより弁別するという、系列位置学習と項目連合学習の2つの過程による説明を行っている。ハトなどの他種における系列学習では、項目間連合か系列位置学習か、あるいはデフォルトルールかという択一的な視点での検証が行われてきた。Orlov et al. (2000) の仮説の妥当性についてはさらなる検証が必要であるものの、このような複数の学習過程の相互作用を取り入れた諸現象の再検証は有効な方向性であると考えられる。

### 系列学習の熟練・大きさと距離の効果

Terrace, Son, & Brannon (2003) は、系列学習課題におけるアカゲザルの学習の熟練と、反応潜時や反応精度に及ぼす大きさと距離の効果について検討した。大きさの効果とは、対となる数の小さな項目と大きな項目の間の距離が常に一定である時、相対的な判断のための反応時間は、小さな項目の大きさが増加するにつれ長くなる (e.g., 7対8の数のどちらが大きいかを判断する時間は、3対4を判断するよりも長くなる) という現象である。距離の効果とは、たとえばアラビア数字やアルファベットの文字列など、大小関係や遠近関係のある一次元上の刺激で構成される対の大きい方を選択する課題において、刺激間の距離が増加するほど反応時間が減少していく現象である。彼らは、7種類の3項目系列(第1-7系列)、11種類の4項目系列(第8-18系列)、4種類の7項目系列(第19-22系列)の順序で22の系列を訓練した。3項目系列と4項目系列の訓練の目的は、新しい系列の項目へ反応するための学習の構えを発達させることであった。その後4種類の7項目系列を構成する項目を用いて、系列内サブセットテスト、系列間サブセットテストを行った。系列内サブセットは、1系列の中の項目のみで構成されるサブセットである。一方、系列間サブセットは、構成する項目が異なる系列から抽出されたものであった(同じ系列位置の項目でサブセットが構成されることはなかった)。3項目系列および4項目系列の習得では、最初の訓練セッションよ

りも最後の訓練セッションで遂行が高くなり、最初の訓練セッションにおける遂行も徐々に高くなった。7項目系列では、学習基準を満たすのに要するセッション数が新たな系列を学習するたびに減少していった。アカゲザルは、系列内サブセット、系列間サブセットともに高い正反応率を示した。どの7項目系列から2項目が抽出されても、その比較が可能であることは項目刺激の系列位置表象を形成していたことを強く示唆する。

系列学習の項目間連合モデルでは、サブセットテストについて、2項目間の距離が長くなるほど反応精度は低くなり、系列学習の空間表象モデルでは、2項目間の距離が長いほど、反応精度が向上すると予測される。結果、2項目間の距離が広がるにつれてサブセットテストでの正反応率は向上した。このこともまた、アカゲザルにおける線形表象の形成を示唆する結果といえる。サブセットの最初の項目についての反応潜時は、2項目間の距離が1であるときに、大きさの効果が認められ、大きさが増すほど反応時間は長くなった。Terrace (2005) はこの研究に用いられた7項目系列課題は、霊長類によって学習されたもので最も難しい系列学習課題であったと述べ、この研究で示されたサルへの遂行がサルの系列学習における熟練の上限かどうかは検討の余地があることを指摘している。新しい系列を学習するために要したセッションが安定して減少したという結果は、サルがより長い系列を習得することができるということを示唆していると考えられる。

### 数的な序列化の能力

Brannon & Terrace (2000) は、アカゲザルを用いて、昇順、降順、非単調な順序で数的な刺激に反応する能力について検討した。実験で用いられた数的な刺激は、1, 2, 3, 4の抽象的な要素を含んでいた。要素には、円、楕円、正方形、長方形、複雑なクリップアートが用いられ、刺激の中でランダムに配置された。刺激の色は6色のうちのいずれかであり、背景色は残りの5色からランダムに選ばれた。クリップアートは黒か灰色であった。

刺激セットは4種類の数(1,2,3,4)のうちのいずれかの要素をそれぞれ含んでいた。大きさ、表面積、形、色などを考慮し、非数的な次元による刺激性制御の可能性を最小限にするために7種類の刺激セットが設定された。アカゲザルに4項目系列の習得訓練を行った。昇順(1→2→3→4)、降順(4→3→2→1)、非単調な順序(3→1→4→2)の各条件に1匹ずつ割り当てて訓練した。訓練終了後、新奇な刺激セットでも正しい系列的反応が認められるか検証した。この実験では1セッションの半分の試行を新奇刺激セットに割り当ててランダムに提示した。

非単調な順序の訓練は学習基準に届かなかったが、昇順系列と降順系列を学習した被験体は学習基準に達し、さらに1-4の数の順序的な刺激セットでの訓練を重ねるにつれて学習の効率が上がった。150の新奇な刺激セットを用いた転移テストでは、遂行成績の劣化は認められず、被験体が数的なルールを学習したことが示唆された。続いて行われた実験では、名義的に定義づけられた1-4の数の刺激セットを順序づけるための特定のルールではなく、数的に定義づけられた刺激に反応するための順序的(昇順、降順)なルールを習得する可能性を検証した。名義的なカテゴリの事例として1-4の数を学習していたのであれば、5-9の数からなる系列については反応がチャンスレベルに留まることが予測される。実験は、1-4(既知)と5-9(新奇)の中から2つを提示し、昇順または降順で反応させた。数の対は既知-既知、既知-新奇、新奇-新奇の3種類、36通りであった。既知-既知対の場合のみ、正反応に対し強化を行った。結果、降順ルールを学習した被験体において、新奇-新奇対に対してはチャンスレベルの正反応率を示したが、昇順ルールを学習した個体はいずれの対に対してもチャンスレベルを上回る遂行を示した。さらに、各対に対する最初の項目への反応精度と反応潜時が刺激の数的な大きさと、対の刺激間の数的な距離によって強く影響を受けることが示された。対間の数的な距離が増加するにつれ、反応精度は増加し、

反応潜時は減少した。これは対の最初の項目が一定の時にも見られた。また、各対の間の数的な距離が一定であっても、数の大きさが増大するにつれ反応精度は劣化し、反応潜時は増加した。数的な比較課題において、このような距離と大きさの効果による反応精度と反応潜時の変動を示すデータは、動物において初めて示されたものである。

## ヒトにおける同時連鎖法を用いた研究

ヒトとその他の動物について、系列学習研究を行う場合、両者間での最も大きな違いは、系列学習の経験数である。このことは、ヒトの言語使用の能力と大きく関係していると考えられる。ヒトは、言語を用いる際、単語を発声する場合には、特定の順序で音を発声する必要があり、情報を伝達する際には文法的な序列の制約に従わなければならない。言語の使用が、ヒトに膨大な系列学習経験をもたらし、優れた情報の序列化の能力を発展させた可能性は十分に考えられる。本節では、同時連鎖法を用いたヒトの系列学習を紹介する。

Colombo & Frost (2001)は系列順序課題におけるヒトの遂行を、第1項目の効果、欠損項目の効果、象徴間距離効果について反応潜時を指標として検証した。17-19歳の大学生に、同時連鎖法を用いて5項目系列まで訓練した。被験者は言語化可能な刺激系列(飛行機、手などの画像が項目として用いられた)が提示される群と非言語的な系列(抽象的な画像が項目として用いられた)が提示される群の2群に分けられた。訓練終了後、2項目サブセットテスト、3項目サブセットテストを行った。2項目、3項目サブセットテストでは遂行は一貫して高い水準であった。サブセットの最初の項目についての反応潜時とその項目の系列位置の間には強い線形関係が認められた(第1項目の効果)。また、3項目サブセットの第2項目についての反応潜時と、第1項目と第2項目の間に原系列上では存在する欠損項目の数の間に線形関係が認められた(欠損項目効果)。さらに、2項目間の距離に比例して反応潜時が減少した(象

微間距離効果)。これらの結果は、ヒトが、5項目系列の線形表象を形成すること。および2項目、3項目サブセットを遂行するために線形表象を利用するというサルに類似した方略(D'Amato & Colombo, 1988)を用いていたことを示唆している。しかし、欠損項目に関してヒトとサルの遂行の違いもみられた。ヒトの場合、 $n$ 項目サブセットの $n$ 番目の項目について欠損項目の効果が認められなかった。これは、ヒトが $n$ 番目の項目についてはデフォルトルールを用いていたからであると説明された。つまり、 $n-1$ 番目までの項目に反応すれば、最終項目への反応はデフォルトルールから決定されるため、線形表象に依存する必要がない。Colombo & Frost (2001) はヒトのサブセットテストにおけるデフォルトルール利用が言語的能力の副産物である可能性を指摘した。Guyla & Colombo (2004) は児童期のヒトの系列表象の獲得過程について実験を行っている。彼らは3歳、4歳、7歳、10歳の児童と成人を用いた。実験はディスプレイ上に現れる複数の図形に対して定められた順序でタッチすることを求めるものであった。原系列の習得が完了した後に、サブセットテストを行った。実験の結果、7歳と10歳の児童と成人は極めて高い水準でテストを遂行したが、3歳と4歳の児童の遂行水準は低いものであった。

Guyla & Colombo (2004) はこの結果を、3歳と4歳の児童においては線形表象の発達、形成が未熟であるからであると指摘した。また、実験結果より、年長の参加者は、項目間のすべての連合が形成されているが、3歳、4歳においては末端項目とそれに隣接する項目間にのみ連合が形成されていることが示唆された。また、7歳の児童の表象水準は、成人の表象水準に近いという結果が出たが、人間の表象形成が7歳において完了するとは考え難い。Guyla & Colombo (2004) の実験は5項目のリストを学習させるものであったが、リストの長さを変化させることにより、両者の表象水準に差がみられる可能性がある。この点について、リストの長さ等の実験変数と発達水準の交

互作用を明らかにするためのさらなる検討が必要である。

## 項目選択法によるラットの系列学習

同時連鎖法は、複数種の動物の系列学習課題として極めて有効なものであった。しかしながら、ハトやサル、ヒト以外の種の系列学習を検証するためには必ずしも有効であるとは言えない。比較認知、比較心理学的視点からはさらに多様な種の動物の系列学習を検討する必要があると考えられる。本節では、報酬系列学習において豊富な知見が得られており、かつ、従来の同時連鎖法を直接適用することが困難であるげっ歯類を対象に筆者らが行ってきた項目選択型の系列学習課題で得られた成果を紹介する。

マウスやラットといったげっ歯類を対象とした系列学習研究は、直線走路を用いた報酬系列学習のパラダイム下で検証されてきた。報酬系列学習では、主に直線走路を使用し、継起する走行に対して与える報酬量を異なる数の45mgの餌ペレットで構成した系列を提示する。例えば5回の走行に対して14-7-3-1-0等の系列を提示し、大報酬に対する速い走行と小報酬、特に無報酬に対する遅い走行を指標として学習を吟味する。このようなラットの報酬系列学習においては、報酬量が増減するような複雑な構造を持つ非単調系列よりも上述のような単調減少系列の方が速やかに学習されること(e.g., Hulse & Dorsky, 1977)、長い系列を単純な構造の下位系列に分節化することによって学習が促進される分節化効果(e.g., Fountain, Henne, & Hulse, 1984)、同じ構造を持つ系列間での学習の転移(Hulse & Dorsky, 1979; 水原・石田, 1990; 谷内, 1995)、または系列構造に基づく新奇項目の推定(Fountain & Hulse, 1981)等の諸現象が発見された。また、項目連合学習に関しても、隣接連合の形成と信号間の刺激般化(Capaldi, Verry, & Davidson, 1980)、遠隔連合の形成(Capaldi & Miller, 1988; Capaldi, Nawrocki, & Verry, 1983; Capaldi & Verry, 1981; 谷内, 1997)、

あるいは系列全体をチャンク化して手がかりとして利用するリスト学習 (Capaldi, 1992; Capaldi, Miller, Alptekin, & Barry, 1990) といった複雑な水準での検証が進められた。これらの知見に基づき、系列構造の符号化に基づくチャンク化というヒトと共通する認知過程を主張する法則符号化仮説 (e.g., Hulse & Dorsky, 1977) と、部分強化研究に基礎を置き、報酬系列学習を強化事象間の連合学習によって説明する記憶弁別学習理論 (e.g., Capaldi & Molina, 1979) の間で激しい論争が行われた (谷内, 1998)。このような論争の過程で、ラットの報酬系列学習の学習過程については、他の動物の系列学習研究と比較しても詳細な水準での検討が行われてきた。

げっ歯類を用いた系列学習研究で、視覚刺激を用いた同時連鎖法が用いられなかった原因として、げっ歯類が視覚劣位の動物であることが挙げられる。げっ歯類を対象としたタッチパネルを用いた研究も存在するが、その結果はげっ歯類における視覚弁別の困難さを示すものであった (坂田・竹田・服部, 2005)。坂田ら (2005) は、タッチパネルを用いてラットに図形刺激の弁別を行わせた。明るさが等価な  $\diagup$  (スラッシュ) と  $\diagdown$  (バックスラッシュ) をそれぞれ正刺激、負刺激として用いて弁別訓練を行ったところ、習得は可能であったものの個体差がみられた。その後  $\diagdown$  の正刺激のみを提示して反応を強化し、 $\diagup$  と  $\diagdown$  の弁別訓練を行ったところ、前述の弁別学習よりさらに多くのセッションを要し、さらに大きな個体差が認められた。これらのことから、ハトや霊長類の系列情報の処理を検証する同時連鎖法は、複雑な視覚弁別を要することから、げっ歯類への適用が困難であると考えられた。

木村・谷内 (2004) は、複数の選択地点をもち、その選択地点に視覚的にも触覚的にも弁別が可能である障壁を項目を設置した周回型の改良型 Hill 迷路を用いて、項目選択法による Wistar 系ラットの系列学習を検討した。装置の詳細については木村・谷内 (2004) に略図を含む解説がある。報酬系列学習とは異なり、選択すべき項目が各選択

地点において同時に提示されている点が、従来の同時連鎖法と共通していた。この研究では、ラットが3項目系列を習得した。また、その後選択地点ごとに項目の配置が異なる新奇配列テストにおいても、原系列と同等の遂行成績が示された。さらに、木村・谷内 (2005) は、Wistar 系ラットに3項目系列を学習させた後、サブセットテストとワイルドカードテストを行った。ラットはすべてのサブセット (AB, BC, AC) に対し原系列に対応した順序で反応し、ワイルドカードテスト ( $W \rightarrow B \rightarrow C$ ,  $A \rightarrow W \rightarrow C$ ,  $A \rightarrow B \rightarrow W$ ) についても70%から90%の遂行を示した。これらの結果から、ラットが単純な反応連鎖を学習しているのではないということ、また項目間連合による系列の遂行が行われていないことが示唆された。しかし、3項目系列習得後のサブセットテストでは、デフォルトルールによる遂行が可能である。また、4項目系列習得後にサブセットテストを行うとしても、内部項目には項目間連合が形成される可能性がある。サブセットテストを用いて系列の遂行方略を詳細に検証するためには、Terrace et al. (1995) が指摘するように、5項目系列の習得後にサブセットテストを導入することが必要である。

石坂 (2007) は、選択地点を1か所に固定した迷路を用い、項目選択法をより同時連鎖法に近づけた手続きで、Long Evans 系ラットの系列学習を検討した。その結果、2項目系列までの習得は確認できたが、3項目系列の習得は困難であった。石坂 (2008) は、改良型 Hill 迷路を用いて同じく Long Evans 系のラットの系列学習を検討したが、3項目系列を学習したラットも4項目系列を学習することはできなかった。改良型 Hill 迷路を用いることにより、ラットの項目選択型の系列学習の検討の可能性が示されたが、習得訓練の安定性という点については、解決すべき問題が指摘される。今後さらに迷路や手続きの精緻化が必要である。また、改良型 Hill 迷路を用いた訓練が、反応連鎖による系列の遂行を排除していることをより明確にすることも必要だろう。オリジナルの Hill 迷路 (Hill, 1939) を用いた研究では、これを

系列学習場面とみなした場合、刺激項目は固定された空間位置である。そのため、被験体が系列的な情報に依存した遂行方略を用いていたのか、それとも反応連鎖によって特定の反応パターンを遂行していたのかどうかは明らかではない。改良型 Hill 迷路は、刺激項目の配列が変更可能であるので、この点を検証可能である。刺激配列を固定した訓練後に新奇配列に対して般化が起らず、多様な刺激配列による訓練が新奇配列に対する般化に寄与していることが明らかになれば、Straub et al. (1979) や Straub & Terrace (1981) によって示されたように、項目選択法においても、訓練配列の多様さが、反応連鎖に依存しない系列の習得を保証していることがより明確に示されるだろう。

## 序列化の能力の種間比較と同時連鎖法の展望

初期の同時連鎖法を用いた系列学習研究においては、系列課題の遂行方略の種間比較が大きなテーマであった。遂行方略については、ハトでは Terrace et al. (1995)、サルでは Chen et al. (1997) において結論が得られたといえる。すなわち、系列遂行において、ハトは3項目系列ではデフォルトルール、4項目以上では項目間連合を用いるのに対して、サルは線形表象にしたがって遂行することが明らかとなった。ハトは、サルやヒトに比べると独特の遂行方略を持つ。デフォルトルールは3項目系列を遂行するには非常に機能的であるように見える。またハトは、4項目以上の内部項目が2つ以上存在する系列では項目連合学習を併せて行っているようである。

ヒトにおける同時連鎖法の研究 (Colomabo & Frost, 2001; Guyla & Colombo, 2004) では、ヒトも線形表象に依存した系列の遂行を行い、それが発達の進行に伴い完成していくことが示された。サルとヒトでは、系列の遂行に線形表象が介在しているという点が共通しているようである。しかしながら、Colombo & Frost (2001) の研究におけるサブセットテストでは、フサオマキザルがサ

ブセットを構成する全ての項目について線形表象に依存していたことを示す反応潜時を示した一方で、ヒトはサブセットの最後の項目にはデフォルトで反応するという傾向を示すなど、一致しない点も見られた。同時連鎖法を用いた系列学習研究では、現在までのところ、遂行方略についてはごく限られた範囲において検証されてきた。それは、たとえば系列の長さにも当てはまる。アカゲザルでは7項目系列までの習得が確認されている (Terrace, Son, & Brannon, 2003) が、ヒトはアルファベット26文字を順序どおりに容易に再生できる。遂行可能な系列の長さといったような量的な問題の種差についても明らかにしていく必要があるだろう。また、アルファベットの例のように、ある程度の長さの系列の遂行が可能であるという場合には、数項目の系列の遂行方略は異なる遂行方略を採用するという質的な問題も現れるかもしれない。我々ヒトは、アルファベットの1番目はA、2番目はBというような系列位置情報に依存した項目の再生が可能であるが、アルファベットの14番目は何か、という問いには即座には答えられないだろう。しかし、Mの次のアルファベット文字は何かという問いにはNと答えることができる。このように系列位置学習と項目間連合という複数の学習過程が介在している可能性がある。もちろん、より長い系列をどのように体制化しているのかということも厳密な実験手続きの下で検証されなければならないが、Terrace et al. (2005) も述べたように、系列の長さによって遂行方略が異なることは種内においても起こりうる。系列の長さのような実験変数の作用についても種差がある可能性も十分に考えられる。いずれにせよ、今後、多様な種間の系列学習能力を比較するために、それぞれの動物の系列の遂行方略をいくつかの実験変数との相互作用という視点を持ちながら検証していく必要があるだろう。

遂行方略についてある程度の知見が得られて以降は、同時連鎖法を用いた研究の主な関心事は、系列学習の熟練、数的な能力、チャンク化などにシフトしてきた。チャンク化についての検討はハ

トにおいてのみ行われており、他のテーマについてはサルを中心に行われてきている。この現状は、遂行方略についての種間の差が明らかとなったことに関係がある。このことは、ハトのチャンク化についての研究は、デフォルトルールの使用を前提として展開されていること、距離と大きさの効果はサルが線形表象を形成することを前提として展開されていることから明らかである。サルにおいては、サブセットテストやワイルドカードテスト、項目の入れ替えテストなどの結果からデフォルトルールの利用は確認されていないが、系列の最初の項目と最後の項目がその他の内部項目に比べ特別な状態であることから、これらの項目の明瞭性が系列の遂行に何らかの影響を与えている可能性も否定できない。しかしながら、遂行方略について、一応の結論が得られたことにより、同時連鎖法を用いた研究は、学習過程の種間比較というよりも種毎に異なる認知機能の検討へ移行していったとみることができる。このような展開から、同時連鎖法が系列学習以外にも数的な能力や学習の構えの検証のための方法論としても有効であるが示されてきている。また、同時連鎖法を用いた研究で主に用いられるサブセットテスト、ワイルドカードテスト、そして項目の入れ替えテストという実験手法は、系列学習研究のみならず、数的能力の実証にも貢献した。

Terrace (2005) は、同じカテゴリの物体（果物、鳥、木など）の写真を項目として用い、同じカテゴリの項目を隣接させることによってサルのチャンク化の検証が可能であることを述べている。ただし、サルはハトにみられるようなデフォルトルールを用いないことが示されているため、サブセットテストへの遂行をチャンク化の指標として用いることができない。また、サルは1項目への反復反応を行わなくなるため、休止時間のデータをとることができない。これらの点での差異を克服する実験パラダイムの確立が系列情報のチャンク化についての種間比較のためには必要である。その一方で、共通する実験パラダイムを適用可能な複数の動物について知見を重ねていくことも重要

である。たとえば、Ohshiba (1997) は、ニホンザル、チンパンジー、ヒトを対象として、同時連鎖課題における選択方略の比較を試みた。消失型同時連鎖と残留型同時連鎖の2つの課題について、それぞれ刺激項目の大きさが単調に変化する単調系列（ $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$ ,  $4 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$ ）と非単調に変化する非単調系列（ $3 \rightarrow 1 \rightarrow 4 \rightarrow 2$ ,  $2 \rightarrow 4 \rightarrow 1 \rightarrow 3$ ）の習得と反応時間を検証した。残留型同時連鎖は、従来の同時連鎖法と同じ手続きであるのに対し、消失型同時連鎖は、試行の開始時に全ての項目が提示されるが、項目に反応する度にその項目の提示が中止されるパラダイムである。5項目系列  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$  の場合では試行の開始時にディスプレイ上に A, B, C, D, E が全て提示される。被験体が A に反応すると、A はディスプレイ上から消失し、B, C, D, E は引き続き提示されている。次に B に反応すると、B は消失し、C, D, E は提示され続ける。5回目の選択では、E のみが提示されることになる。この実験の結果、消失型同時連鎖において、ニホンザルでは単調系列、非単調系列の両方で、項目の数が減少していくごとに反応時間が短くなっていった。これはニホンザルが各選択段階で選択すべき項目を探索していたことを示唆するもので、Ohshiba (1997) は、この選択方略を逐次探索 (serial search) と呼んだ。これに対し、単調系列におけるチンパンジー、単調、非単調系列におけるヒトは、1項目目の選択時の反応時間が最も長く、2項目目以降は1項目目よりも短く、しかもほぼ均一の反応時間を示した。これは試行の開始時に全ての項目を同定し、その後選択を行っていることを示すもので、Ohshiba (1997) は、この方略を一括探索 (collective search) と呼んだ。残留型同時連鎖では、チンパンジー、ヒトだけでなくニホンザルも一括探索を行っていたことが示された。

大芝 (1998) が述べたように、D'Amato & Colombo (1989) の用いたフサオマキザルや Swartz et al. (1991) の用いたアカゲザルは残留型同時連鎖において一括探索を行っていたことが示された。逐次探索、一括探索のいずれを行うかは、課題と

動物種に依存するようである。一括探索は、系列学習課題において、動物が試行の開始後反応を行う前にプランニングを行っていることを示唆するものである。これが、消失型同時連鎖課題において、ニホンザルには見られず、チンパンジーとヒトには見られたという事実は興味深い。Ohshima (1997) は、高度な認知能力を有する動物ほど一括探索を行う傾向があることから、一括探索は、認知機能の進化の過程で逐次探索よりも後に現れた認知機能である可能性を指摘している。今後、系列学習課題におけるプランニングの研究は、大芝 (1998) が述べたように、刺激の提示された位置を同定し、刺激の提示位置の表象をワーキングメモリに保持することでプランニングが成立しているという仮説と、Terrace (2005) が指摘したプランニングが系列のどの程度の位置まで行われているのかという問題について研究が進められる必要がある。また、これらの研究では、刺激項目が選択されるたびに、項目の配置が変更されるようなプランニングが有効でなくなるテスト法も有効であると考えられる。

Terrace (2005) は、同時連鎖法という実験パラダイムは、メタ認知、系列的に体制化された行動を成立させる神経メカニズムなどを検証するための実験の基盤となること、そして、チャンク化やプランニングの他にも、同時連鎖法を用いた推移的推論、複数のリスト項目の記憶などの研究の進展によって、言語的なヒトの心が、非言語的な動物の心のモデルから説明されることについての人々の疑問に答えることができるようになると述べている。同時連鎖法を用いた研究は、動物とヒトの認知能力の比較における重要な懸け橋としてさらなる展開が期待される。

同時連鎖法がハトや霊長類の系列学習研究に適用できたのは、これらの動物種が優れた視覚を有しているからといえる。これは同時に、視覚優位ではない動物種に同時連鎖法を適用することの困難さを意味している。その点で、木村・谷内 (2004, 2005) が提示した改良型 Hill 迷路は視覚優位でない動物の系列学習を検討する可能性を示

すものであるといえる。木村・谷内 (2004, 2005) の示した、項目選択法を用いたラットの系列学習の結果は、同時連鎖法で得られたハトや霊長類における知見と直接比較可能ではないかもしれない。しかし、項目選択型の系列学習課題という点で、項目間連合や系列位置情報の獲得といった系列の遂行方略を検証可能であること、Terrace (2005) が同時連鎖法の展望として示したチャンク化や推移的推論課題などの検証が可能であることなど、げっ歯類を含めた視覚劣位の種の系列情報の処理過程を探る基幹的な手続きとなりうることを示した。手続き的な差異を克服して、さまざまな種における系列学習の知見を得ることは、系統発生の視点から、系列情報の処理過程の変遷を理解するという意義を持っており、今後さらに研究を進めてゆく必要があると考えられる。

系列学習の遂行方略については、主に項目間連合の形成と線形表象の獲得という2つの概念を用いて議論がなされてきた。項目間連合に関しては、隣接しない項目間の遠隔連合という複雑さは持つものの、先行項目が後続項目の弁別刺激として機能するという点からその学習内容を明確に特定することが可能である。一方で、線形表象の形成による系列位置学習に関しては、系列位置情報の源泉が空間的性質によるものなのか、数的情報によるものなのか、十分には明らかにされていないと思われる。また、同じ動物種においても、実験条件に応じて、学習を媒介する情報が変化するという視点からの研究もあり得ると考えられる。例えば、ヒトの成人の5項目系列学習では、線形表象の形成による系列位置学習が行われることが示されているが (Colombo & Frost, 2001)、アルファベット学習の例を考えると、極端に長い系列を各項目の系列位置の学習によって習得しているとは考えにくく、項目間連合の関与を考えるべきであると思われる。このように考えると、項目間の提示間隔等の同時連鎖法では制御されてこなかった変数や系列の長さ等に依存して、関与する学習過程が変化するという視点からの研究も必要であると考えられる。系列学習過程の系統発生と個体発

生, 実験変数による影響, 計数や推論等の他の課題との関連性について, 研究を行うべき余地は多いと考えられる。

## 引用文献

- Brannon, E. M., & Terrace, H. S. (2000). Representation of the numerosities 1-9 by rhesus macaques (*Macaca mulatta*). *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 26, 31-49.
- Capaldi, E.J. (1992). Levels of organized behavior in rats. In W.K. Honig & G. Fetterman (Eds.), *Cognitive aspects of stimulus control* (pp.385-404). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Capaldi, E.J., & Miller, D. J. (1988). The rat's simultaneous anticipation of remote events and current events can be sustained by event memories alone. *Animal Learning & Behavior*, 16, 1-7.
- Capaldi, E.J., Miller, D.J., Alptekin, S., & Barry, K. (1990). Organized responding in instrumental learning: Chunks and superchunks. *Learning and Motivation*, 21, 415-433.
- Capaldi, E.J., & Molina, P. (1979). Element discriminability as a determinant of serial-pattern learning. *Animal Learning & Behavior*, 7, 318-322.
- Capaldi, E.J., Nawrocki, T.M., & Verry, D.R. (1983). The nature of anticipation: An inter- and intraevent process. *Animal Learning & Behavior*, 11, 193-198.
- Capaldi, E.J., & Verry, D.R. (1981). Serial order anticipation learning in rats: Memory for multiple hedonic events and their order. *Animal Learning & Behavior*, 9, 441-453.
- Capaldi, E.J., Verry, D.R., & Davidson, T.L. (1980). Memory, serial anticipation pattern learning, and transfer in rats. *Animal Learning & Behavior*, 8, 575-585.
- Chen, S., Swartz, K.B., & Terrace, H. S. (1997). Knowledge of the ordinal position of list items in rhesus monkeys. *Psychological Science*, 8, 80-86.
- Colombo, M., & Frost, N. (2001). Representation of serial order in humans: A comparison to the findings with monkeys (*Cebus apella*). *Psychonomic Bulletin & Review*, 8, 262-269.
- D'Amato, M. R., & Colombo, M. (1988). Representation of serial order in monkeys (*Cebus apella*). *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 14, 131-139.
- D'Amato, M. R., & Colombo, M. (1989). Serial learning with wild card items by monkeys (*Cebus apella*): Implications for knowledge of ordinal position. *Journal of Comparative Psychology*, 103, 252-261.
- Fountain, S.B., Henne, D.R., & Hulse, S.H. (1984). Phrasing cues and hierarchical organization in serial pattern learning by rats. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 10, 30-45.
- Fountain, S.B., & Hulse, S.H. (1981). Extrapolation of serial stimulus patterns by rats. *Animal Learning & Behavior*, 9, 381-384.
- Hill, C. J. (1939). Goal gradient, anticipation, and perseveration in compound trail-and-error learning. *Journal of Experimental Psychology*, 25, 566-585.
- Hulse, S.H., & Dorsky, N.P. (1977). Structural complexity as a determinant of serial pattern learning. *Learning and Motivation*, 8, 488-506.
- Hulse, S.H., & Dorsky, N.P. (1979). Serial pattern learning by rats: Transfer of a formally defined relationship and the significance of nonreinforcement. *Animal Learning & Behavior*, 7, 211-220.
- Guyla, M., & Colombo, M. (2004). The Ontogeny of Serial-Order behavior in Humans (*Homo sapiens*): Representation of a List. *Journal of Comparative Psychology*, 118, 71-81.
- 石坂憲寿 (2007). 項目選択法におけるラットの系列学習の検討 2006年度金沢大学文学部人間学科卒業論文 (未公開)
- 石坂憲寿・木村誠・谷内通 (2008). Long Evans 系ラットを用いた改良型 Hill 迷路における 4 項目系列学習の検討 日本動物心理学会第68回大会発表要旨 (印刷中)
- 木村誠・谷内通 (2004). ラットによる改良型 Hill 迷路を用いた 3 項目系列の習得 動物心理学研究, 54, 99-103.
- 木村誠・谷内通 (2005). 改良型 Hill 迷路を用いたワイルドカードテストによるラットの系列学習課程の検討 心理学研究, 76, 276-281.
- 水原幸夫・石田雅人 (1990). 系列ボタン学習に及ぼす餌ペレットからサッカリン溶液への強化子移行の効果 基礎心理学研究, 8, 61-68.
- Ohshiba, N. (1997). Memorization of serial items by Japanese monkeys, a chimpanzee and humans. *Japanese Psychological Research*, 39, 236-252.
- 大芝宣昭 (1998). ハトと霊長類の系列学習 心理学評論, 41, 411-422.
- Orlov, T. Yakovlev, V., Hochstein, S., & Zohary, E. (2000). Macaque monkeys categorize images by their ordinal number. *Nature*, 404, 77-80.
- 坂田省吾・武田奈央子・服部稔 (2005). タッチパネルを用いたラットの図形弁別の試み 動物心理学研究, 55, 88.
- Straub, R. O., Seidenberg, M. S., Bever, T. G., & Terrace, H. S. (1979). Serial learning in the pigeon. *Journal of The Experimental Analysis of Behavior*, 32, 137-148.
- Straub, R. O. & Terrace, H. S. (1981). Generalization of serial learning in the pigeon. *Animal Learning & Behavior*, 9, 381-384.



- havior, 9, 454-468.
- Swartz, K. B., Chen, S., & Terrace, H. S. (1991). Serial learning by Rhesus monkeys: I. Acquisition and Retention of multiple four-item lists. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 17, 396-410.
- 谷内通 (1995). ラットの系列パターン学習における系列間転移と保持間隔の効果 動物心理学研究, 45, 21-29.
- 谷内通 (1997). ラットにおける強化系列の習得と消去に及ぼす項目配列の効果 心理学研究, 68, 255-263.
- 谷内通 (1998). ラットの系列学習研究とその展開 心理学評論, 41, 392-407.
- Terrace, H. S. (1986). A nonverbal organism's knowledge of ordinal position in a serial learning task. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 12, 203-214.
- Terrace, H. S. (1987). Chunking by a pigeon in a serial learning task. *Nature*, 325, 215-234.
- Terrace, H. S. (1991). Chunking during serial learning by a pigeon: I. Basic evidence. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 17, 81-93.
- Terrace, H. S. (2005). The simultaneous chain: a new approach to serial learning. *Trends in Cognitive Sciences*, 9, 202-210.
- Terrace, H. S., & Chen, S. (1991a). Chunking during serial learning by a pigeon: II. Integrity of a chunk in a new list. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 17, 92-104.
- Terrace, H. S., & Chen, S. (1991b). Chunking during serial learning by a pigeon: III. What are necessary conditions for establishing a chunk? *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 17, 107-118.
- Terrace, H. S., Chen, S., & Newman, A. B. (1995). Serial learning with a wild card by pigeons (*Columba livia*): Effect of list length. *Journal of Comparative Psychology*, 109, 162-172.
- Terrace, H. S., Son, L. K., & Brannon, E. M. (2003). Serial expertise of rhesus macaques. *Psychological Science*, 14, 66-73.